



VÝVOJ NANOVLÁKENNÝCH KOMPOZINÍCH MATERIÁLŮ S INKORPOROVANÝM AKTIVNÍM UHLÍM PRO FILTRAČNÍ ÚČELY

Bakalářská práce

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3106R004 – Netkané textilie

Autor práce: **Ivan Ulman**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.





THE DEVELOPMENT OF NANOFIBER COMPOSITE MATERIALS WITH THE INCORPORATED ACTIVE CARBON PARTICLES FOR FILTRATION PURPOSES

Bachelor thesis

Studijní program: B3107 – Textil
Studijní obor: 3106R004 – Netkané textilie

Autor práce: **Ivan Ulman**
Vedoucí práce: Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI

Fakulta textilní

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Ivan Ulman**
Osobní číslo: **T11000197**
Studijní program: **B3107 Textil**
Studijní obor: **Netkané textilie**
Název tématu: **Vývoj nanovlákených kompozitních materiálů s inkorporovaným aktivním uhlím pro filtrační účely**
Zadávající katedra: **Katedra netkaných textilií a nanovlákených materiálů**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Vypracování rešerše.
2. Návrh zařízení pro vnášení aktivního uhlí.
3. Příprava nanovlákeného kompozitního materiálu s částicemi aktivního uhlí.
4. Analýza připravených materiálů.
5. Zhodnocení výsledků.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

- 1) WEISS, Zdeněk, Gražyna SIMHA-MARTYNKOVÁ a Ondřej ŠUSTAL. Nanostruktura uhlíkatých materiálů. Vyd. 1. Ostrava: Repronis, 2005, 132 s. Nanotechnologie a nanomateriály. ISBN 80-732-9083-9
- 2) RAKESH K. GUPTA, Elliot Kennel. Polymer nanocomposites handbook. Boca Raton: CRC Press, 2010. ISBN 08-493-9777-4
- 3) PALSSON, Bernhard a Sangeeta BHATIA. Tissue engineering. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, c2004, xviii, 407 p. ISBN 01-304-1696-7
- 4) CHAPMAN, Edited by R.A. Applications of nonwovens in technical textiles. Cambridge, U.K: Woodhead Publishing in association with the Textile Institute, 2010. ISBN 978-184-5694-371
- 5) CAMPBELL, F. Manufacturing processes for advanced composites. Oxford: Elsevier, 2004, 517 s. ISBN 18-561-7415-8
- 6) RAMAKRISHNA, Seeram. An introduction to electrospinning and nanofibers. Hackensack, NJ: World Scientific, c2005, xi, 382 p. ISBN 98-125-6454-3
- 7) GUCERI SELCUK, Gogotsi. Nanoengineered nanofibrous materials: proceedings of the NATO ASI on Nanoengineered and Nanofibrous Materials, Belek-Antalya, Turkey, 1-12 September, 2003. S.l.: Springer, 2004, xi, 382 p. ISBN 14-020-2549-1
- 8) RENEKER, Darrell H a Hao FONG. Polymeric nanofibers: proceedings of the NATO ASI on Nanoengineered and Nanofibrous Materials, Belek-Antalya, Turkey, 1-12 September, 2003. Washington, DC: Distributed by Oxford University Press, c2006, xii, 430 p., [15] p. of plates. ISBN 978-084-1239-197.


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jiří Chvojka, Ph.D.


Katedra netkaných textilií a nanovláknenných materiálů

Datum zadání bakalářské práce: 17. června 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 14. května 2015


Ing. Jana Drašarová, Ph.D.
děkanka




prof. RNDr. David Lukáš, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 17. června 2014

PROHLÁŠENÍ

Byl jsem seznámen s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé bakalářské práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé bakalářské práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Poděkování

Velice děkuji Ing. Jiřímu Chvojkovi, Ph.D., vedoucímu mé bakalářské práce, za jeho čas, pomoc, vedení, rady u praktické i teoretické části a v neposlední řadě i za jeho velkou trpělivost. Dále bych rád poděkoval Doc. Ing. Evě Košťákové, Ph.D., za její obětavé zkoumání vzorků pod rastrovým mikroskopem a poskytnutí informací. Poděkování patří i Bc. Filipu Sanetrníkovi za pomoc při laminaci vzorků.

Děkuji také své rodině a kamarádce Bc. Ivaně Puchalové, kteří při mně stáli celou dobu studia a plně mě podporovali.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá výrobou sorpčního materiálu s inkorporovaným aktivním uhlím, které je zachycováno mezi vrstvy elektricky zvlákněného polymeru, přichyceného na spunbond textilií. U výroby byla měněna rychlost dávkování aktivního uhlí, což určovalo jeho množství, přičemž byly použity dva rozdílné polymery, ze kterých byla vyráběna nanovlákna. V textu je popsán přístroj a technologie výroby, která byla postupem procesu měněna a zlepšována. Cílem práce bylo vyrobit filtrační materiál, který by měl lepší vlastnosti než stávající materiál a byl by schopný nahradit funkční vrstvy ochranných oděvů pro armádní či jiné účely.

Klíčová slova:

Filtrace, aktivní uhlí, nanovlákna, elektrické zvláknění, kompozitní materiál

Anotation

Bachelor thesis deals with the production of sorbent material with incorporated active carbon that is trapped between layers of electronically spun polymer, which was attached to the “spunbond” material. In the production rate was varied dosage of activated carbon, which determined the quantity and two different types of polymers were used, from which nanofibers were produced. The text describes the device and technology of production, by which the process was changed and improved. The aim of bachelor thesis was to produce the filter material, which would have better properties than existing ones and would be eventually able to replace functional layers of protective clothing for military or other purposes.

Key words:

Filtration, active carbon, nanofibers, electrospinning, composite material

Obsah

Úvod	11
1 Rešerše	12
2 Teoretická část.....	14
2.1 Aktivní uhlí	14
2.1.1 Výroba aktivního uhlí	14
2.1.2 Typy aktivního uhlí a jeho použití.....	16
2.2 Filtrace	17
2.3 Nanovlákná	18
2.3.1 Elektrické zvlákňování (Electrospinning)	18
2.3.1.1 Zvlákňování pomocí strunného válečku	19
2.4 Bikomponentní vlákna	21
2.5 Spunbond	22
2.6 Desikanty	22
2.6.1 Silikagel	23
2.7 Ultrazvuk.....	24
2.7.1 Sonotroda.....	25
2.8 Laminace.....	26
2.9 Kompozit.....	27
3 Praktická část.....	28
3.1 Polymerní roztoky a jejich příprava.....	28
3.2 Naprašovací zařízení	29
3.3 Výroba filtrů.....	30
3.3.1 Vzorky I.....	32
3.3.2 Vzorky II.....	34
3.3.3 Vzorky III	35
3.3.4 Vzorky IV	39
3.3.5 Vzorky V	40
3.4 Laminace vzorků.....	43
3.5 Prodyšnost.....	44
4 Analýza připravených materiálů	46
4.1 Analýza průměrů vláken	46

4.2	Analýza homogenity materiálu	46
4.3	Analýza zaplnění aktivním uhlí	47
4.4	Analýza úbytku hmotnosti aktivního uhlí.....	48
4.5	Porovnání rozdílných materiálů	49
Seznam použité literatury:		56
Seznam obrázků:.....		59
Seznam tabulek:.....		60
Seznam zkratek:.....		61

Úvod

Cílem bakalářská práce bylo vyrobit několik sérií vzorků kompozitního materiálu pro filtrační účely, zhotoveného z vrstev nanovláken, mezi které bylo vsypáno aktivní uhlí pro sorpci chemických látek, a poté byla nanovláknová laminována mezi bikomponentní spunbond textilie. Tento filtrační materiál by mohl nahradit stávající funkční netkané vrstvy s aktivním uhlím v ochranných oděvech používané Armádou České Republiky nebo jiné materiály používané pro filtraci.

Rešerše se zabývá již články, které pojednávají o použití aktivního uhlí pro sorpci škodlivých látek. Jedna studie se zmiňuje o jeho využití ve vodárenství, kdy je aktivní uhlí zařazeno v předposlední fázi pro filtraci mikropolutantů. Druhý je patent, který popisuje výrobu ochranných oděvů s použitím aktivního uhlí a netkaných textilií. Poslední třetí článek navazuje na patent a rozšiřuje jeho výrobu o pár vylepšení.

V teoretické části jsou popsány použité materiály a technologie, které byly pro výrobu vybrány, a pracovalo se s nimi pro vylepšení výsledného zkušebního materiálu určeného pro filtraci.

Experimentální část se potom zabývá samotnou výrobou vzorků, které byly vyrobeny v pěti sériích za použití dvou odlišných polymerů pro elektrické zvlákňování. Dále je popsána úprava naprašovací technologie pro lepší chod přístroje s cílem rovnoměrnějšího sypání a rozložení aktivního uhlí. V rámci praktické části došlo k vyhodnocení vyrobených vzorků, které proběhlo z bakalářské práce navazující na tuto. V neposlední řadě porovnává vyrobené vzorky touto technologií s technologií používanou nyní pro výrobu ochranných oděvů.

1 Rešerše

Výzkum o použití aktivního uhlí je teprve ve zrodu, ovšem už teď je známo, že je velice účinné pro sorpci a odstranění škodlivých chemických látek. Odborné publikace například referují o průmyslovém čištění vod pomocí aktivního uhlí. Aktivní uhlí se používá při primárním či sekundárním čištění odpadních vod, dále při čištění bazénových vod, ale i úpravě pitné vody. Právě sekundárním čištěním odpadních vod se zabývá i článek s anglickým názvem „Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration“, v překladu „Odstranění mikropolutantů a snížení biologické činnosti v plném rozsahu rekultivace rostlin, pomocí ozonizace a filtrace aktivním uhlím“. Článek referuje o zpětném vypouštění odpadních vod, čištěných šestifázovým postupem, do kterého jsou zahrnovány následující procesy: denitrifikace, pre-ozonizace, koagulace / flokulace / flotace vzduchem a filtrace, hlavní ozonizace, filtrace aktivním uhlím a konečná dezinfekce ozonizací. Aktivní uhlík je zařazen v páté fázi pro velkou efektivitu absorpce zbylých mikropolutantů a rozpuštěného organického uhlí [1].

S aktivním uhlím se však můžeme setkat i v oděvním průmyslu zaměřeném na ochranu lidského těla, a to ve funkčních vrstvách armádního oblečení. Například v roce 1986 byl podán patent na výrobu sorpčních filtrů a ochranných oděvů Gigliou a jeho spolupracovníkem Battistellim, s názvem „Non-woven activated carbon fabric“, v překladu „Netkané textilie s aktivním uhlím“, který ovšem obsahoval návrh na vyráběné filtry pouze z netkaných textilií a aktivního uhlí. Podstatou vynálezu byl materiál obsahující absorpční částice či vlákna aktivního uhlí vyráběný mokrou cestou, tedy naplavováním, podobně jako se vyrábí papír. Pojivem pro netkaný materiál a aktivní uhlí byla akrylová vlákna. Celý filtr bylo možné dál laminovat prodyšnými lepidly ve formě pěn, akrylovými latexy či polyuretany. S množstvím použitého pojiva pro zabránění sesypání aktivního uhlí je ochranný oděv málo prodyšný, navíc je svojí konstrukcí i zbytečně těžký. Patent byl pro výrobu uznán a technologie je využívána dodnes [2].

Článek s názvem „Development of chemical protective clothing“, se zabývá výrobou netkaných textilií s aktivním uhlím, který navazuje na patent Giglii. Gopalakrishnan a jeho spolupracovníci ale píší o pětivrstvé modifikované netkané textilii s inkorporovaným aktivním uhlím. První vrstvou jsou bavlněná či umělá vlákna, pokrytá voděodolnou vrstvou. Druhá, třetí a čtvrtá vrstva je tvořena takzvaným sendvičem, který je složen ze dvou vrstev netkaných textilií a mezi nimi je aktivní uhlí s pojivem, pro zabránění jeho úniku. Pátou vrstvou je zde podšívkový bavlněný materiál. Pojivem pro aktivní uhlí byla použita polyuretanová pěna nebo polyuretanová lepidla. I tento ochranný oděv byl díky pojivu málo prodyšný, proto byly vyrobeny selektivně propustné membrány, kterými došlo ke zlepšení prodyšnosti. Propustné membrány byly funkční, ovšem jejich výroba byla příliš drahá, a proto byly nahrazeny vpichovací technologií. Jde o průnik jehel, které svými hroty zpevní netkaná vlákna a pro lepší proudění vzduchu vytvoří v materiálu průduchy [3].

2 Teoretická část

Teoretická část je zaměřena na představení jednotlivých používaných technologií a materiálů, které byly při výzkumu týkající se bakalářské práce použity, ovlivňovaly samotnou výrobu a výsledné vlastnosti filtrů.

2.1 Aktivní uhlí

Aktivní uhlí je speciálně vyráběný typ uhlíku, u kterého bylo dosaženo vysokého počtu pórů a zvýšil se tak jeho měrný povrch. Mikroporozita aktivního uhlí je tak velká, že jen jeden gram má plochu cca. 300-4000 m²/g[4]. Velký vnitřní povrch je potom velmi vhodný pro adsorpci pevných, kapalných a plyných látek. Rozeznáváme mikropóry, které jsou menší než 2 nm, mezopóry pohybující se v rozmezí od 2 nm do 50 nm a makropóry s velikostí pórů větších než 50 nm [4].

Mezopóry a makropóry jsou takzvané transportní póry, které jsou chodbami k aktivním centrům (mikropórům) pro organické látky [5].

2.1.1 Výroba aktivního uhlí

V dnešní době je prakticky možné vyrobit aktivní uhlí z jakékoliv látky, která má vysoký podíl uhlíku. Nejčastěji používané je černé uhlí, kokosové skořápky a dřevo (viz obrázek 1) [6]. Velikost pórů je při výrobě ovlivněna použitím různých surovin, jak je znázorněno v tabulce 1.

Tabulka 1: Objem pórů pro různé suroviny [4]

Suroviny pro výrobu aktivního uhlí	Mikropóry (cm ³ /g)	Mezopóry (cm ³ /g)	Makropóry (cm ³ /g)
Antracit	0,51	0,07	0,11
Černé uhlí	0,43	0,17	0,26
Hnědé uhlí	0,22	0,58	0,33



Obrázek 1: Suroviny pro výrobu aktivního uhlí [6]

Nejběžnějším ale ne jediným způsobem výroby aktivního uhlí je technologie aktivace parou a vzduchem nebo plynem.

Výchozí surovina je nejdříve vysoušena při 400-500°C, poté je promývána pod tlakem horkou vodou, kdy se odstraňují přebytečné soli a minerály. Mikropóry se tvoří až působením směsí vzduchu a vodní páry, oxidu uhličitého (CO_2) či kouřového plynu při teplotách 800-1000°C, které zde fungují jako oxidační činidla. Uvolňují se zbytky nežádoucích látek a vytvářejí se tak mikropóry [4] [5]. Kouřové plyny jsou směsí vzdušného dusíku, zbytku kyslíku, oxidu uhličitého, vodních par a dalších látek.

Dalším způsobem k získání aktivního uhlí může být chemická aktivace, u které jsou výchozími surovinami především piliny či hobliny dřeva, které jsou vystaveny působením aktivačních činidel.

Bylo zjištěno, že velikosti finálních pórů udávají typy aktivačních dehydratačních činidel. Mezi nejběžnější aktivační činidla patří například kyselina fosforečná (H_3PO_4), chlorid zinečnatý (ZnCl_2) a některá z alkalických sloučenin (např. uhličitán draselný - K_2CO_3 , uhličitán sodný - Na_2CO_3 , chlorid sodný - NaCl , ...). Vhodné aktivační činidlo však musí splňovat tři kritéria. Prvním kritériem je schopnost impregnovat surovinu, dalším dobrá rozpustnost ve vodě a poslední podmínkou je, aby se při hoření neměnila na jinou sloučeninu [5].

Maximálního měrného povrchu bývá dosaženo při teplotě karbonizace 600°C aktivací chloridem zinečnatým a kyselinou fosforečnou. Aktivací alkalickým kovem byly maximální plochy získány při 800°C. Aktivní uhlík připravený z uhličitanu draselného dosahoval plochy téměř 2000 m²/g [7]. Výrobou z chloridu zinečnatého však bylo dosaženo aktivního uhlí s povrchem až 2400 m²/g [8].

Chemická aktivace obsahuje dva kroky – impregnace a karbonizace. Připravené piliny či hobliny se namočí do roztoku aktivačního činidla k impregnaci. Směs se suší a poté se karbonizuje při 450-600°C, v této chvíli uhelnatí aktivační činidlo a produkt se dále zahřívá při teplotách vyšších než 800 °C. Vypálené uhlí se ponechává chladnout v uzavřené v peci. Vychladlé uhlí se nakonec ještě promývá destilovanou vodou pro odstranění zbylých krystalků soli. Zaktivované uhlí je ve finální fázi sušeno [9].

2.1.2 Typy aktivního uhlí a jeho použití

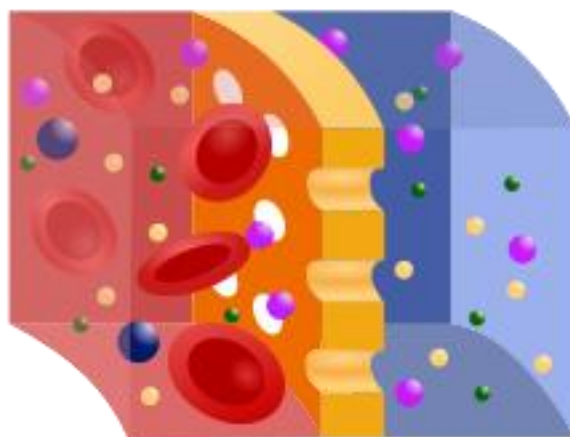
Podle potřeby a použití se aktivní uhlí vyrábí v mnoha tvarech a velikostech. Nejznámějším typem je práškové uhlí, které slouží v oblasti farmacie, čištění emisních plynů či pro odstranění organických toxinů z půdy. Granulované aktivní uhlí je používáno převážně k čištění bazénové a pitné vody. Extrudované neboli válečkové aktivní uhlí se používá především k adsorpci plynů, například v lakovnách [10]. Posledním typem je vláknité aktivní uhlí, které se také používá pro sorpci plynů, a to hlavně v automobilovém průmyslu.

Jeho schopnost absorbovat organické látky může být umocněna katalyzátory. Ve vodném prostředí je schopný rozpouštět chlór na chlorid a sirovodík na síran. Na svém povrchu dokáže odstranit velmi nebezpečné látky, jako jsou například ropné látky, benzen, toluen, pesticidy a tak dále. Ze vzduchu je schopný odstranit páry organických rozpouštědel, kyanovodík, produkty spalovacích procesů a co je pro nás důležité, bojové otravné látky [10].

2.2 Filtrace

Filtrace je dělicí metoda, která dokáže separovat pevné látky z kapaliny či plynu na porézní přepážce neboli filtru. Kapaliny a plyny procházejí póry v přepážce, zatímco se pevná látka zachycuje na povrchu přepážky. Filtrační přepážky jsou vyrobené z různých materiálů, někdy i z kompozitu. V laboratoři se nejčastěji setkáme s filtračním papírem, ale mimo ni se můžeme setkat i s filtry látkovými či pískovými. Rozeznáváme filtraci hloubkovou, kdy se zachycují velmi malé částice v pórech díky adsorpci, a filtraci povrchovou [11] [12].

Povrchové filtrace se dělí podle toho, jak velké částice jsou schopné zachytit na svém povrchu. Známe běžné filtrace, kdy se velikost zachycených částic pohybuje nad $10\mu\text{m}$. Následují mikrofiltrace, které zachycují částice v rozmezí od $0,1\mu\text{m}$ do $10\mu\text{m}$. Od nich se dostáváme k metodám založených na semipermeabilních membránách, což jsou polopropustné membrány propouštějící určité molekuly a ionty. Propustnost určují fyzikální a chemické vlastnosti membrány a jejího prostředí. Příkladem může být cytoplazmatická membrána (viz obrázek 2). Dalším typem jsou ultrafiltrace, které filtrují částice o velikostech od 5nm do $0,1\mu\text{m}$. U nanofiltrací se spíše udávají molární hmotnosti filtrovaných látek, což je od 200 g/mol do 15000 g/mol (přibližně $1\text{nm} - 10\text{nm}$). V neposlední řadě to jsou hyperfiltrace, které zadržují velikosti molekul menší než 200g/mol [11] [12].



Obrázek 2: Polopropustná membrána (žlutě). Převzato z [11]

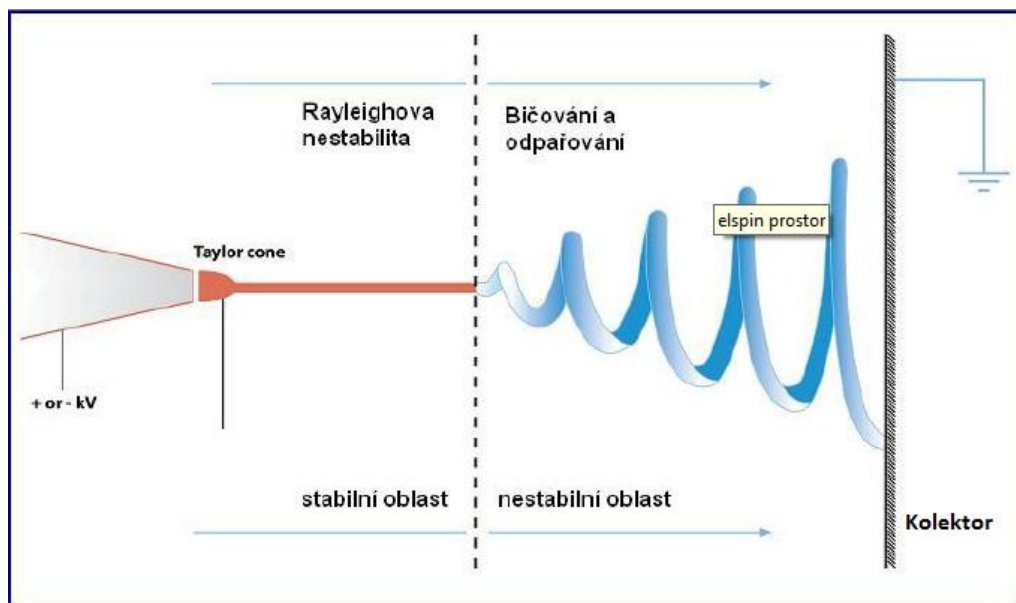
2.3 Nanovláknna

Nanovláknna jsou speciálně vyráběné délkové útvary specifické svými vlastnostmi a rozměry. Průměr se pohybuje v desítkách, někdy až stovkách nanometrů, a proto jsou někdy označovány jako submikronová vlákna. Výsledný průměr, který se odvíjí od konkrétních zvláknovacích podmínek a zvoleného materiálu, se pohybuje mezi 100 - 800nm. Surovinou pro výrobu nanovláken jsou syntetické a přírodní polymerní roztoky nebo taveniny, kterých se v dnešní době čítá již přes padesát. I při malých velikostech pórů mají typicky vysokou pórovitost, prodyšnost a velký měrný povrch [13].

2.3.1 Elektrické zvláknování (Electrospinning)

Elektrické zvláknování je technologie na výrobu nanovláknenných plošných materiálů z polymerního roztoku nebo polymerní taveniny. Zvláknování z taveniny je známé spíše jako melt-electrospinning, a proto si pod pojmem electrospinning představíme spíše zvláknování z roztoku. Principy zvláknování z polymerního roztoku dělíme na jehlové a bezjehlové, které je známé i pod pojmem zvláknování z volné hladiny. Mezi jehlové zvláknování patří zvláknování z jedné jehly, dále pak z více jehel a v neposlední řadě může být jedna jehla umístěna naproti jehle druhé. Do bezjehlového zvláknování řadíme zdaleka více způsobů, a to zvláknování z tyčky, z hladkého válečku, ze strunného válečku, z řetízku, pomocí spirály, pomocí disku, a tak dále. Zvláknovat se dají organické polymery, syntetické polymery a biopolymery. Průměr vláken tvořené touto technologií se pohybuje od 100nm - 1000nm [13].

Přístroj se skládá ze dvou opačně elektricky nabitých elektrod, z nichž jedna je v kontaktu s polymerem a druhá, nazývaná jako kolektor, slouží k ukládání nanovláken. Zvýšením elektrického napětí na elektrodě s polymerem se začnou tvořit tzv. Taylorovy kužely, které dále přecházejí ve stabilní oblast. Po dosažení kritického napětí začnou bičovat, čímž se polymery dluží, odpařuje se rozpouštědlo a dochází k tvorbě nanovláken (viz obrázek 3). Finální podoba vláken je závislá na parametrech výroby, jako je například vzdálenost elektrod, typ elektrod, typ polymeru, koncentrace polymeru, ale také na přírodních faktorech, jako je teplota či vzdušná vlhkost [14].

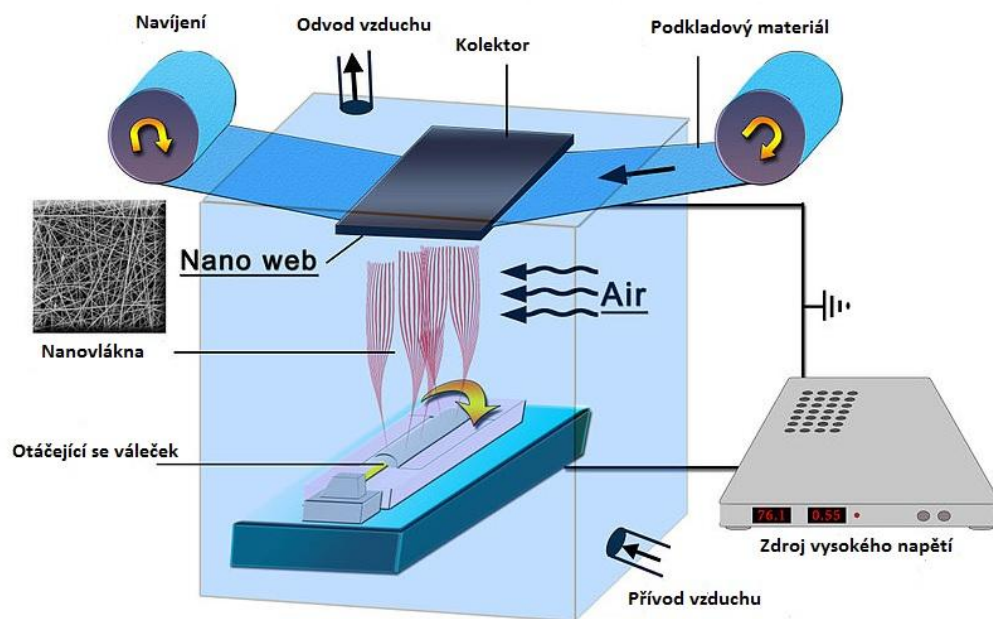


Obrázek 3: Zvlákňování polymeru. Převzato z [13]

2.3.1.1 Zvlákňování pomocí strunného válečku

Zvlákňování pomocí válečků je efektivní způsob, jak kontinuálně vyrábět velké množství nanovlákných vrstev. Technologie válečkového zvlákňování poskytuje široké využití nejen při výrobě membrán v textilním průmyslu, ale i v oblastech medicíny, armády, ochrany životního prostředí atd. [13]

Otáčející se váleček je částečně ponořený ve vaničce polymeru, přičemž je do něj přiváděno vysoké napětí. Roztok polymeru se otáčením zachycuje na struny a pomocí elektrického pole se začíná zvlákňovat. Taylorovy kužely se tvoří po celé struně válečku. Z již vytvořených Taylorových kuželů se stávají stabilní oblasti, z kterých následně vznikají nestabilní – takzvané bičují, což znamená, že se odpařuje rozpouštědlo polymeru a dochází k zvlákňování a ukládání nanovláken na opačně nabitý kolektor [13], znázorněno na obrázku 4.

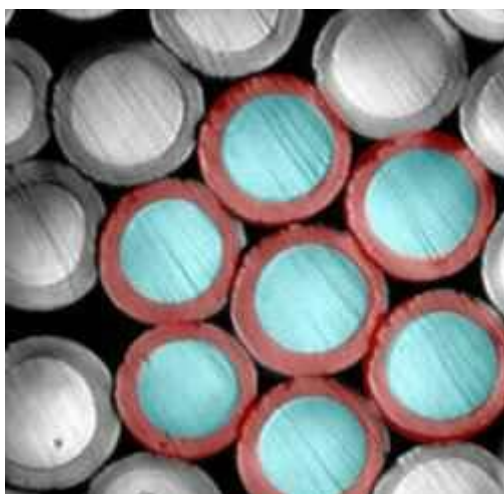


Obrázek 4 : Zvlákňování pomocí válečku. Převzato z [13]

Technologie zvlákňování válečkem byla vynalezena v roce 2003 na Technické univerzitě v Liberci prof. RNDr. Oldřichem Jirsákem, CSc. a jeho týmem. Patentová práva na výrobu byla následně odkoupena firmou Elmarco, u které je tato technologie známá jako Nanospider [15].

2.4 Bikomponentní vlákna

Bikomponentní vlákna jsou chemická vlákna, většinou vyrobená zvláštní zvláknovací hubicí ze dvou polymerů s odlišnými chemickými či fyzikálními vlastnostmi. Měkčí polymery se používají především na svrchní část vlákna ke zlepšení omaku a měkkosti. Obaly vláken mají většinou nižší teplotu tání, pro případné použití jako pojivé složky jimi lze nahradit i samotné pojivo [16].



Obrázek 5: Bikomponentní vlákna jádro/plášť [17]

Podle průřezu vlákna se rozeznávají vlákna typu side by side - česky strana/strana, dalším typem je core/sheath - česky jádro/obal (viz obrázek 5) nebo matrix/fibril - česky ostrovy v moři nebo také matrice/vlákna. Existují ještě další typy odvozené od zmíněných druhů, například multiple side by side - česky mnohonásobná strana/strana, multiple radial – česky více radiální a v neposlední řadě multi core - česky multijádro [18].

2.5 Spunbond

Spunbond textilie jsou netkaná textilní rouna, která mohou být vyráběna z kterýchkoliv známých polymerů. Vhodným výběrem výchozího polymeru pro výrobu, můžeme získat produkt s mnoha kladnými vlastnostmi. S výrobou však úzce souvisí i zpevňování rouna a další úpravy. Pro použití finálního produktu například v lékařství či oděvním průmyslu, je vhodnou volbou ke zpevnění vrstvy pojení kalandrem, využívané pro svoji rychlost, dále ultrazvukem, mechanickým vpichováním nebo všíváním. Pro použití v jiných odvětvích průmyslu je možné použít i další metody zpevnění textilie, například chemickou impregnací [19].

Technologie je používána hlavně pro svoji rychlost výroby, která je několikanásobně vyšší, než u tkacích strojů. Spunbond textilie jsou vyráběny pro použití v lékařství, automobilovém průmyslu, oděvním průmyslu, zemědělství, stavebnictví, vojenství a podobně [19].

2.6 Desikanty

Desikanty jsou látky, které jsou schopné pohlcovat vzdušnou vlhkost nebo pomáhají materiálu se zbavit vlhkosti. Mají schopnost na sebe navázat ze svého okolí nejen vodní páry, ale i jiné chemické látky, které v sobě skladují při celém objemu a povrchu. Takto nasycené látky potom mění svůj tvar a měknou. Při vysušení se dají opět použít. Mezi hydroskopické látky patří například silikagel, aktivní uhlí, síran vápenatý,.... Přírodním desikantem je rýže, často používaná ve slánkách k udržení správné granulity soli. I chlorid sodný (sůl) je také dobrou hydroskopickou přírodní látkou, používanou již po staletí [20].

2.6.1 Silikagel

Silikagel je pórovitý amorfnní granulát oxidu křemičitého (viz obrázek 6), jehož vysoká pórovitá struktura pohybující se kolem 800 m²/g snadno umožňuje absorbovat širokou škálu látek. Nejčastěji se však používá pro absorpci vlhkosti. Silikagel má stejně jako aktivní uhlí mikropóry s poloměrem o velikosti 1nm, mezopóry o poloměru 1-25nm a makropóry s velikostí větší než 50nm [10].

Výroba se provádí synteticky přidáním kyseliny sírové do křemičitanu sodného, vytvořená sraženina se nakonec dehydratuje. Výsledné vlastnosti jsou dány způsobem sušení.

Použití nachází při hlubokém sušení bioplynu jako prevence proti korozi zařízení, které bioplyn uchovává, při řízení vlhkosti v muzeích, knihovnách, pro indikaci vlhkosti nebo i jako součást steliva pro kočky. Nasycený silikagel se zahříváním na 120°C vysušuje a je ho možné znovu použít[10].



Obrázek 6: Různé typy silikagelu[10]

2.7 Ultrazvuk

Ultrazvuk je stejně jako zvuk akustické vlnění s tím rozdílem, že je jeho vlnová délka kratší než u slyšitelného zvuku. Znamená to tedy, že ultrazvuk, jehož frekvence se pohybuje od 16 kHz výš, je pro naše sluchové orgány neslyšitelný. Mnoho živočichů ultrazvuk ale vnímá, někteří ho dokonce používají k dorozumívání či pohybu v prostoru, například delfini či netopýři [21].

Přeměnou elektrické energie na akustickou dokážeme ultrazvuk využít ve svůj prospěch. Účinky ultrazvuku lze dělit na biologické, mechanické, tepelné a chemické. Pro svou krátkou vlnovou délku nachází využití při bádání mořského dna, pro pozorování ryb, či pohybu ledovce. Další využití nachází nejen při lékařských diagnostikách pacienta (těhotenství, vyšetření štítné žlázy, apod.), ale i například při svařování či hledání vad materiálu [21].

Zdrojem ultrazvukového vlnění mohou být generátory elektrostrikce a piezoelektrického jevu, znázorněno na obrázku 7. Pod pojmem elektrostrikce rozumíme chování feromagnetických látek, které se působením střídavého proudu roztahují a smršťují. Při piezoelektrickém jevu je používána křemičitá destička, která se také napětím roztahuje a smršťuje. Destička je pro zdroj ultrazvuku drahá a málo výkonná, proto byly křemičité krystaly nahrazeny syntetickými látkami [21].



Obrázek 7: Zdroj ultrazvuku

2.7.1 Sonotroda

Sonotrody se nejčastěji vyrábějí z titanových slitin, duralu nebo kalené oceli. Využívají se při svařování plastů a kovů nebo k vzorování finálních produktů. Jde o modifikovanou tepelnou energii - tření, kterou získáme vysokou frekvencí mechanického kmitu, kdy je nejprve nutné změnit elektrickou energii na již zmíněný vysokofrekvenční mechanický pohyb. Sonotrody (viz obrázek 8) zajišťují přenos tohoto kmitu do spojovaných materiálů, kde dochází k tření a zvýšení teploty materiálu, až je v podstatě deformován. Přítlakem se docílí promísení materiálů a jejich svaření [22]. Sonotrody vytvářejí ultrazvukové vibrace - tlakové vlny, které byly využívány k rozmetání aktivního uhlí po podkladové textilií za účelem zvýšení stejnoměrnosti jeho rozložení.



Obrázek 8: Sonotroda pro rozptýlení aktivního uhlí

2.8 Laminace

Laminování je jeden z mnoha způsobu pojení textilií. Výsledný produkt, zvaný také jako laminát, je jednolitá plocha tvořená ze dvou, tří a více vrstev. Takový výrobek se stává kompozitní a díky tomu může dosahovat lepší pevnosti, pružnosti, zvukotěsnosti, voděodolnosti, prodyšnosti, vzhledu nebo jiných vlastností, podle typu použitých materiálů.

Podle způsobu nanášení pojiva rozdělujeme spoj laminace:

- v ploše – pojivo se nachází v celé ploše materiálu
- bodově – pojivo je nanášeno na určitých místech v malých množstvích
- vzorově – pojivem může být třeba termoplastická mřížka, která vytvoří výsledný vzor
- lineárně – nanáší se v pruzích [23]

Rozeznáváme dva hlavní typy laminace, jedním typem je mokrá laminace a druhým je suchá laminace.

„Při mokré laminaci se na jeden nebo více materiálů aplikuje tekuté pojivo. Jednotlivé vrstvy se spojí a pod tlakem (pro dobré propojení) vysuší“. Tekutým pojivem může být pasta, disperze, roztok či pěna [24].

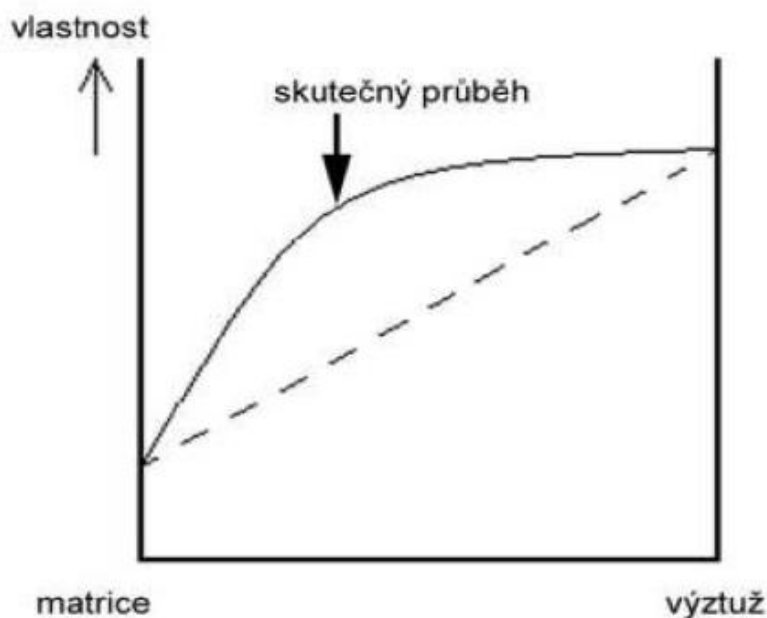
Suchou laminací se pojí vrstvy působením teploty a tlaku při daném čase. Pojícím materiálem může být fólie, mřížka, vlákenná vrstva, prášek, hot-melt (tavenina) a podobně. Pojivem mohou být i samotné pojené vrstvy (například bikomponentní spunbond textilie) [23].

Laminace nachází širokou škálu použití v různých odvětvích průmyslu. Používá se například v oděvním průmyslu při výrobě funkčního oblečení, automobilovém průmyslu u dekoračních látek střešních potahů a sedadel, ochranných materiálech hasičských sborů a policie či vojenských oděvech u armády. Nachází uplatnění i ve zdravotnictví na chirurgických obličejových maskách, chirurgických pláštích, inkontinentních pomůckách a tak dále [23].

2.9 Kompozit

Slovo kompozit pochází z latinského slova compositus nebo compositum, což v překladu znamená sloučenina. Kompozitním materiálem je tedy vše, co je složeno ze dvou či více odlišných látek. Tento termín však kompozitní materiál neodděluje od klasických heterogenních směsí, proto výsledný produkt musí mít nové vlastnosti, které nemají použité složky. Tento jev je tzv. synergický efekt. „Synergický efekt nám říká, že kombinací materiálů je nutné získat nové, odlišné vlastnosti, než poskytují samotné materiály nebo lepší vlastnosti než je jen prostý součet vlastností materiálů, z nichž se kompozitní materiál skládá. Synergický účinek je tedy objektivní charakteristika, kterou se kompozitní materiály odlišují od ostatních.“ Synergismus nám tedy říká, že vlastnosti kompozitního materiálu jsou lepší, než pouhé sečtení jednotlivých složek, znázorněno na obrázku 9 [25].

Nejjednodušším příkladem kompozitního materiálu u netkaných textilií je směs vláken se vzduchem, kterou lze ve finální podobě použít jako termoizolační materiál.



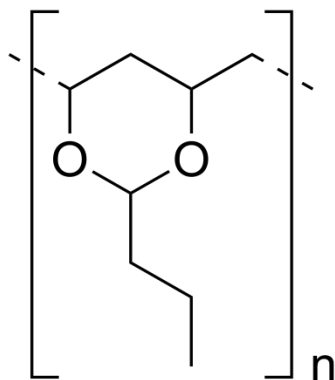
Obrázek 9 : Synergický jev [25]

3 Praktická část

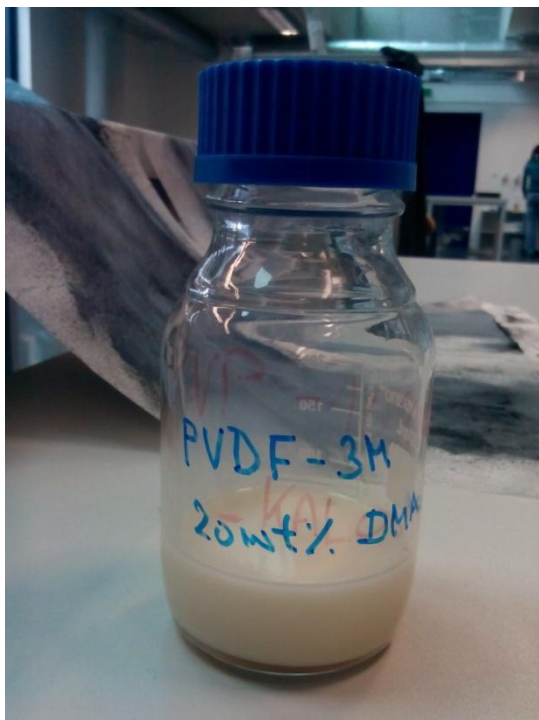
Praktická část bakalářské práce se zaměřuje na samotnou výrobu filtrů a vývoj naprašovacího zařízení. Výroba filtrů směřuje především k přesnějšímu dávkování a rovnoměrnějšímu rozprostření aktivního uhlí, které je spojeno s naprašováním pomocí dávkovače a homogenizace sonotrodou.

3.1 Polymerní roztoky a jejich příprava

Pro výrobu byly vybrány dva polymerní roztoky. Jedním z nich byl hydrofilní 10hm% polyvinylbutyral - PVB (Mowital B60H, 60.000 molekulová hmotnost, japonské firmy Kuraray), rozpouštěný v etanolu. Strukturní vzorec je na obrázku 10. Druhým používaným polymerem byl hydrofobní 20hm% kopolymer polyvinylidenfluorid - PVDF (viz obrázek 11), od firmy 3M, rozpouštěný v dimethylacetamidu - DMA.



Obrázek 10: Strukturní vzorec PVB [26]



Obrázek 11: Rozpuštěný kopolymer PVDF v DMA

Práškový polymer byl navážen na laboratorních vahách v požadované koncentraci vůči rozpouštědлу, a poté vsypán do lahvičky s již připraveným a naváženým rozpouštědlem. Uzavřená lahvička s polymerem byla následně pro lepší smíchání směsi umístěna do třepacího zařízení Heidolph Vibramax 100, kde byla ponechána až do dalšího dne.

3.2 Naprašovací zařízení

K výrobě jsme využívali laboratorní přístroj vedený pod názvem patentu „Způsob vytváření funkční nanovlákněné vrstvy a zařízení k provádění způsobu“ [27]. Zařízení se skládalo z naprašovacího zařízení, u kterého je možné regulovat frekvence a rychlost naprašování, sonotrody, která pomáhala rozprostřít aktivní uhlí po celé ploše vyráběného vzorku, otáčejícím se dopravníkem a zvlákňovacím strunným válečkem, který byl ponořen ve vaničce s polymerním roztokem. Přístroj je znázorněn na obrázku 12. Dalšími částmi přístroje byly zdroje pro výrobu kladného a záporného vysokého napětí.



Obrázek 12: Laboratorní přístroj pro výrobu nanovláknenných filtrů. Přístroj se skládá z: 1) Dávkovací silo aktivního uhlí 2) Sonotroda 3) Dopravník s vyráběným filtrem 4) Strunný váleček ve vaničce s polymerem 5) Vibrační zařízení (dávkování aktivního uhlí)

3.3 Výroba filtrů

Nejprve bylo nutné najít vhodné nastavení geometrie zařízení pro správnou funkci a fungování celé technologie, zároveň byl naplněn zásobník na aktivní uhlí. Všechny části přístroje byly raději pro jistotu správného chodu znovu zkontrolovány. Frekvence kmitu zásobníku aktivního uhlí byla nastavena konstantně na 220Hz, neboť vykazovala nejlepší hodnoty. Amplituda dávkování aktivního uhlí byla měněna na přístroji Afag – PSG1 dle potřeby nebo podle vlastních uvážení. Posledním krokem příprav bylo natažení podkladové textilie na válečky dopravníku, její konce byly spojeny oboustrannou lepicí páskou. Pokrokem ve výrobě byla později navlékána na ten samý dopravník, který byl ovšem vylepšen obyčejným balicím papírem na pásový dopravník. Podkladem pro zachycení nanovláken byla použita pojená bikomponentní netkaná textilie typu spunbond od firmy Pegas nonwovens. Roztok polymeru byl vlit do vaničky s kladně nabitým a kontinuálně se

otáčejícím strunným válečkem. Otáčením válečku byl polymer nanášen na jednotlivé struny, kde vytvářel tenký film a pomocí vysokého napětí byl zvlákňován. Záporně nabitý drátek neboli elektroda, umístěná mezi válečky dopravníku, zajišťovala zachycování vláken na podklad. Kostra dopravníku byla uzemněna, aby se na něj nanovláknena nezachycovala. Při prvních pokusech výroby filtru bylo zjištěno, že aktivní uhlí nanesené přímo na spunbond textilií, skrz ni propadávalo. Tento problém byl snížen povlákněním podkladové textilie jedním cyklem otočení dopravníku. Zachycená nanovláknena tak svou vrstvou pokryla velké póry spunbondu a zamezila tím propadávání aktivního uhlí. Na spunbond textilií s vytvořenou vrstvou nanovláken bylo sypáno aktivní uhlí z již zmíněného naprašovacího zařízení, které bylo rozfoukáváno pomocí sonotrody upevněnou nad dopravníkem u dávkovače prášku. Dále vzorek procházel několika cykly naprašování a následným nanesením jedné nebo více vrstev polymerních vláken, které aktivní uhlí zachycovalo ve vrstvách a vytvořil se tak kompozitní materiál, který je teoreticky popsán v kapitole 2.9. Posledním krokem tohoto experimentu bylo nanesení nanovláken bez naprašování pro ukončení procesu a zamezení propadávání aktivního uhlí. Takto vyrobené vrstvy se následně laminovaly přidáním další spunbond textilie na poslední vrstvu nanovláken.

Rychlost dopravníku:

$$t = 3\text{min } 41\text{sec} = 221\text{sec.}$$

$$s = 95,5 \text{ cm}$$

$$v = s/t$$

$$v = 0,432 \text{ cm.s}^{-1}$$

3.3.1 Vzorky I

První výroba vzorků byla čistě zkušební a byla prováděna především z důvodu nalezení vhodného technologického nastavení všech daných parametrů a jejich vzájemné kombinace. Dávkované aktivní uhlí padalo na sonotrodu nakloněnou pod úhlem 45° , která aktivní uhlí rozptylovala na menší kousky a homogenně nanášela po vyráběné textilií. Používaným polymerem byl polyvinylbutyral. Amplituda se s každým vyráběným vzorkem měnila na dohodnuté hodnoty.

Před započítím výroby vzorku 1 byly do zásobníku nasypány silikagelové kuličky k vysoušení aktivního uhlí. Amplituda byla nastavena konstantně na 69%. Vzorek prošel počátečním zvlákňováním, poté třemi průchody nasypávání aktivního uhlí za současného nanášení nanovláken a nakonec byl opět vrstven zvlákňováním.

U vzorku 2 byla amplituda nastavena na 61%, silikagelové kuličky byly ponechány v zásobníku. Vzorek prošel procesem nanášení nanovláken, poté byl vzorek v hlavní části výroby podroben čtyřem cyklům průchodu pod nasypávajícím se aktivním uhlím a současným zvlákňováním polymeru. Nanovlákná byla nakonec nanášena ještě po dobu jednoho otočení.

Před výrobou vzorku 3 došlo k vyjmutí většiny silikagelových kuliček. Amplituda byla nastavena na 64,5%. Nanovlákná byla nanášena s prvním a posledním otočením, aktivní uhlí bylo dávkováno po dobu tří průchodů za současného zvlákňování. Optická analýza materiálu prokázala lepší výsledky ohledně homogenity a struktury vytvořeného materiálu, na rozdíl od dvou předcházejících vzorků

Před započítím výroby vzorku 4 bylo zásobní silo na aktivní uhlí vyčištěno od všeho uhlí a silikagelových kuliček. Na rozdíl od vzorků 1 – 3 bylo u tohoto vzorku do sila vsypáno aktivní uhlí, které bylo předem vysoušeno v laboratorní sušárně. S prvním průchodem byla opět nanášena nanovlákná. Amplituda tentokrát nebyla konstantně nastavena. Během pěti průchodů s nanášením aktivního uhlí a nanovláken byla amplituda sypaní aktivního uhlí několikrát měněna z důvodu dosažení vyššího efektu sypaní

uhlí, které se i přesto hůře dávkovalo, což je znázorněno na obrázku 13. Průměrná hodnota amplitudy byla 67%. Rozdílné hmotnosti vzorků jsou v tabulce 2.



Obrázek 13: Nerovnoměrné dávkování aktivního uhlí

Tabulka 2: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí - první série výroby

	Celková hmotnost	Hmotnost aktivního uhlí	Amplituda dávkování
Vzorek 1	5,85 g	0,735 g	69%
Vzorek 2	6,31 g	1,134 g	61%
Vzorek 3	7,43 g	2,315 g	64,5%
Vzorek 4	6,65 g	1,415 g	67%

3.3.2 Vzorky II

Zařízení s dávkovacím sílem a sonotrodou bylo v tomto případě natočeno o cca. 30° vůči dopravníku s podkladovou textilií a vyráběným filtrem, znázorněno na obrázku 13. Natočené dávkovací zařízení mělo teoreticky zvýšit stejnoměrnost nanášené vrstvy aktivního uhlí. Použit byl polymer polyvinylbutyral. Frekvence byla nastavena na 220Hz a hodnota amplitudy měněna. Hodnoty v tabulce 3 udávají hmotnosti vzorků a amplitudy dávkování aktivního uhlí.



Obrázek 14: Natočené dávkovací zařízení se sonotrodou

První vzorek prošel pouze třemi průchody s nanesením nanovláken bez sypání aktivního uhlí. Tento vzorek byl kontrolní a byl vyráběn pro porovnávání se vzorky s aktivním uhlím a pro zjišťování odchylek při výrobě.

Při výrobě druhého vzorku přístroj dávkoval aktivní uhlí amplitudou 60%. Dávkování aktivního uhlí bylo v porovnání s předešlou výrobou plynulé. Vzorek prošel nejdříve nanášením nanovláken, poté bylo dávkováno aktivní uhlí s následným pokrytím nanovláknou po dobu čtyř průchodů a nakonec navíc nanесena vrstva nanovláken.

Při tvorbě třetího vzorku byla nanесena vrstva nanovláken a amplituda sypání aktivního uhlí nastavena na 60%, kdy docházelo k jeho nestejnomyernému nasypávání. Prvnímu průchodu byla tedy ponechána amplituda 60%, při druhém, třetím, čtvrtém a pátém průchodu s dávkováním aktivního uhlí a následným nanášením nanovláken byla nastavena až na 75%, kdy přístroj dával jako by byla nastavena nižší hodnota. Poslední průchod byl proveden s nanесením další vrstvy nanovláken.

U čtvrtého vzorku bylo celkem 8 průchodů, kdy první a poslední průchod bylo jen s nanovláknem bez přítomnosti aktivního uhlí. Během zbylých šesti průchodů bylo na vyráběný vzorek nanášeno aktivní uhlí při nastavené amplitudě dávkování 75% a s následným navlákněním.

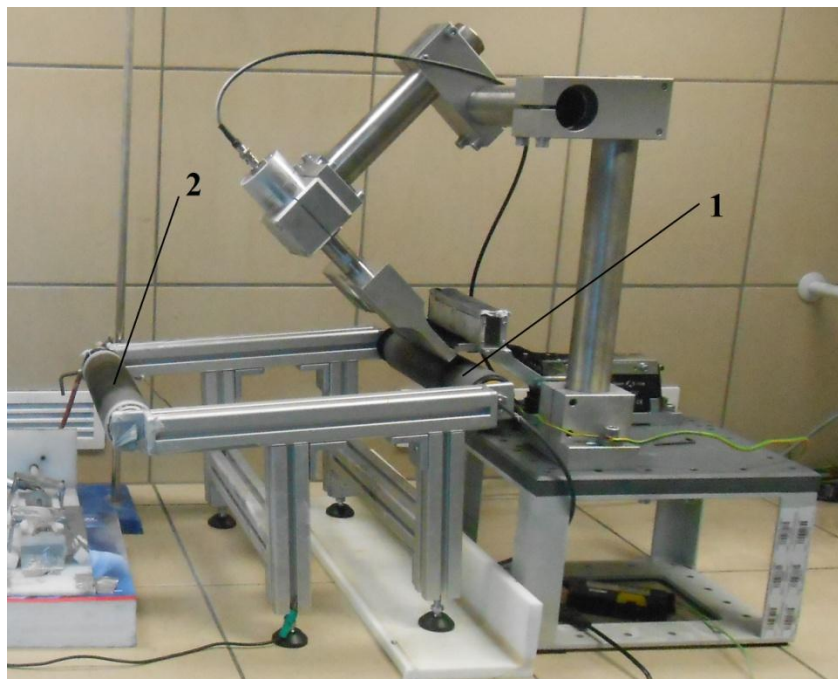
Tabulka 3: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí - druhá série výroby

	Celková hmotnost	Hmotnost aktivního uhlí	Amplituda dávkování
První vzorek (kontrolní)	5,02g	_____	_____
Druhý vzorek	6,44 g	1,473 g	60%
Třetí vzorek	7,19 g	1,954 g	75%
Čtvrtý vzorek	8,77 g	2,234 g	75%

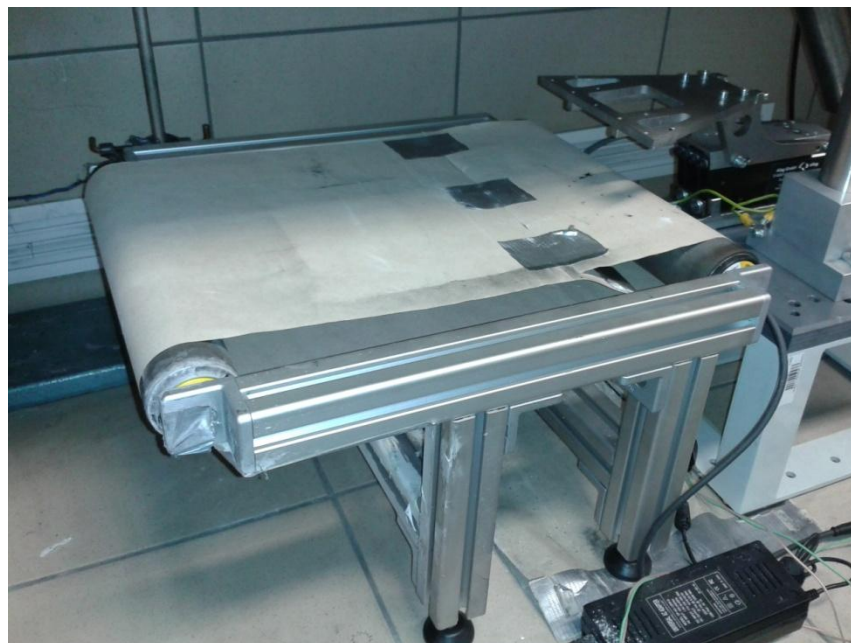
3.3.3 Vzorky III

Do této doby byla podkladová spunbond textilie instalována na dopravník skládajícího se ze dvou válečků – jeden poháněný a druhý nepoháněný (viz obrázek 15), vzdálených od sebe asi 50 centimetrů. Takto natažená spunbond textilie, přichycená oboustrannou lepicí páskou, se však v místech, kde neměla podporu, srašťovala a vlnila. S tímto faktorem se aktivní uhlí shluovalo v místech, kde zvlnění bylo pod úrovní výšky dopravníkových válečků. Proto byl na válečky dopravníku natažen obyčejný balicí papír (viz obrázek 16), pomocí kterého byl dopravník modifikován na

pásový dopravník a dosáhlo se tak lepšího rozmístění aktivního uhlí. Záporně nabitý drátek, doposud umístěný mezi válečky dopravníku, byl přemístěn nad dopravník.



Obrázek 15: Válečky dopravníku. 1) Poháněný váleček 2) Nepoháněný váleček



Obrázek 16: Modifikovaný dopravník

Zkušební vzorek prošel otočením s nanesenou vrstvou elektricky zvlákněného polymeru, poté byla amplituda sypání aktivního uhlí nastavena na 75%, kdy ovšem nastal první problém. Špatně skládaný papír na dopravníku měnil vzdálenost od sonotrody (viz obrázek 17) a docházelo tak k nerovnoměrnému rozložení aktivního uhlí. V důsledku toho bylo zjištěno, že tomu tak bylo celou dobu, kdy byl spunbond natahován na dopravník pouze z válečků. Spunbond textilie se vlnila a aktivní uhlí se shlukovalo v nižších místech. Sonotroda tudíž neměla stálou vzdálenost od aktivního uhlí a nebyla tak schopna zvýšit jeho homogenitu. Pro rovnoměrnější rozložení aktivního uhlí došlo k technologické úpravě zařízení, kdy pevná poloha sonotrody od materiálu byla nahrazena polohou proměnlivou. Toto bylo provedeno manuálně a docházelo k dynamickému působení sonotrody na technologický proces. Pojem dynamické působení se rozumí držení a hýbání sonotrody nejen do všech stran, ale i se změnami výšky od materiálu. Amplituda byla stále nastavena na 75% a vzorek prošel třemi průchody s nanesením aktivního uhlí. Pro zaslepení vzorku se nanášela nanovláknenná vrstva po dobu dvou průchodů dopravníku kolem vaničky s polymerem. Tento vzorek nebyl zvážen.



Obrázek 17: Špatně skládaný pás dopravníku

První vzorek byl vyráběn stejně jako zkušební. Prvním otočením byl pokryt vrstvou nanovláken, následně potom byly nanášeny částice uhlí s amplitudou 75%, které už byly rozfoukávány pomocí sonotrody dynamicky. Bylo zjištěno, že přitlačením dávkovacího zařízení k podkladu (laboratorní lince), přístroj lépe dodával aktivní uhlí, a proto byla v průběhu výroby amplituda změněna na 65%, kdy bylo permanentně tlačeno na zařízení. Přístroj dával více, než bylo požadováno, ovšem amplituda mu byla ponechána. Aktivní uhlí bylo sypáno po dobu třech otočení dopravníku s následným navlákněním. Na přemístěném záporně nabitým drátku ulpívala nanovláknina a docházelo k deformaci elektrody, což mělo neblahý vliv na celý proces. Důsledkem toho musela být výroba přerušena. Záporně nabitá elektroda byla umístěna zpět mezi válečky dopravníku. Pro ukončení procesu byl vzorek pokryt nanovláknem po dobu dvou průchodů.

Druhý vzorek byl vyráběn obdobně jako první vzorek s tím rozdílem, že se aktivní uhlí nanášelo jen v intervalu dvou otočení dopravníku. Při výrobě bylo na aktivní uhlí působeno dynamicky pomocí sonotrody a přístroj přitlačován k laboratorní lince. Dávkovač aktivního uhlí sypal s amplitudou 65%. Naměřené hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 4.

Tabulka 4: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – třetí série výroby

	Celková hmotnost	Hmotnost aktivního uhlí	Amplituda
První vzorek	8,1 g	2,879 g	65%
Druhý vzorek	7,14 g	1,986 g	65%

3.3.4 Vzorky IV

Prvním vyrobeným vzorkem byl kontrolní vzorek, který byl tvořen osmi vrstvami nanovláken, bez přítomnosti aktivního uhlí.

Při tomto experimentu byly vyrobeny vzorky, které měly stejný počet vrstev nanovláken i aktivního uhlí, amplituda dávkování aktivního uhlí byla u vzorků měněna. Zařízení bylo přitlačováno k laboratorní lince pro lepší dávkování aktivního uhlí. Na počátku výroby byl aplikován nanovláknenný materiál na podkladovou textilií, následovalo naprášení pěti vrstev aktivního uhlí s navlákněním polymerních vláken, a v průběhu posledních dvou průchodů byla opět nanášena pouze nanovláknena bez sypání aktivního uhlí. Výroba byla ovlivněna pouze mechanickým rozmítáním aktivního uhlí pomocí sonotrody. Hodnoty amplitudy (dávkování) byly pečlivě vybrány, aby nedocházelo k malému či naopak přespřílišnému dávkování. Bohužel, přes všechny snahy bylo aktivní uhlí přerušovaně dávkováno a polymer byl zvláknován ve shlucích, což způsobovalo nestejně rozložení nanovláknenného materiálu na podkladovou textilií. Hodnoty amplitudy a naměřené hmotnosti jsou uvedeny v tabulce 5.

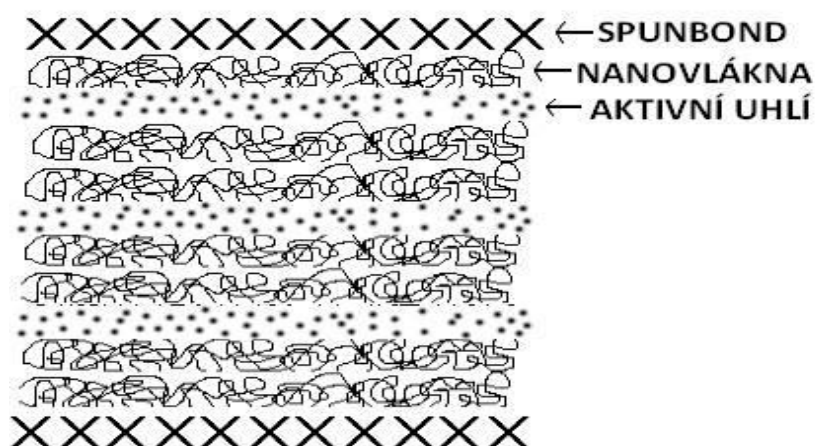
Tabulka 5: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – čtvrtá série výroby

	Celková hmotnost	Hmotnost aktivního uhlí	Amplituda
Kontrolní vzorek	5,3 g	—————	—————
Vzorek 1a	6,8 g	1,5 g	35%
Vzorek 1b	7,3 g	2 g	45%
Vzorek 1c	6,5 g	1,2 g	50%

3.3.5 Vzorky V

Doposud byl zvlákňováným polymerem polyvinyl butyral. Tyto vzorky byly ovšem vyráběny z polymerních nanovláken polyvinyliden fluoridu. Po nalití polymeru do vaničky s otáčejícím se válečkem a zapnutí vysokého napětí bylo okamžitě patrné, že se polymer zvlákňuje efektivněji. Amplituda byla u prvních dvou vzorků nastavena na 55%, třetí vzorek byl kontrolním, další dva vzorky byly vyráběny s amplitudou dávkování 60%. Vzorky byly vyrobeny s rozdílným počtem průchodů naprášení aktivního uhlí a nanášení nanovláken. Aktivní uhlí bylo po celém povrchu rozmítáno dynamickým působením sonotrody, kdy docházelo ke kontinuálnímu dávkování aktivního uhlí z práškovacího zařízení.

První vzorek byl vyroben z celkem sedmi vrstev. Prvním průchodem byla podkladová textilie pokryta polymerními nanovlákný. Druhým průchodem se již nasypávaly částice aktivního uhlí a následně nanášela nanovlákná, která byla v této výrobě zdvojnásobena, pro snížení porózy a zamezení propadávání aktivního uhlí mezi nanovlákným materiálem. Znamená to tedy, že se na naprášeném aktivním uhlí vytvořily dvě vrstvy nanovláken, a poté se na tyto dvě vrstvy opět nasypávalo aktivní uhlí. Takto byly vyrobeny ještě další dvě vrstvy (viz obrázek 18). Při tomto pokusu bylo zpozorováno zachycování polymerních vláken polyvinylidifluoridu na částech sypacího zařízení, která znemožňovala kontinuálnímu dávkování aktivního uhlí, což je znázorněno na obrázku 19. V průběhu výroby bylo tedy naprašovací zařízení očišťováno od vzniklých pavučinek polymerních vláken k docílení nepřetržitého sypání aktivního uhlí.



Obrázek 18: Schematické znázornění vrstev

Druhý vzorek byl vytvořen k porovnání s prvním vzorek. Vzorek tvořilo pět vrstev. První vrstvou byla nanosená nanovláknna, další tři vrstvy tvořilo naprášené aktivní uhlí s následným zaslepením nanovláknny a poslední vrstvou byla opět polymerní nanovláknna.

Třetím vzorkem byl vzorek kontrolní, pro porovnání hmotností a pozdějšímu zjištění množství nasýpaného aktivního uhlí. Vzorek byl vytvořen pěti vrstvami nanovláken.



Obrázek 19: Zachycující se nanovláknna

U čtvrtého vzorku byla amplituda nastavena na 60%. Správným dávkováním bylo sypáno více, než bylo požadováno, nicméně byla amplituda ponechána na dané hodnotě. Prvním průchodem byla nanosena nanovlákna, dalšími čtyřmi průchody naprášeno aktivní uhlí s navlákněním a při posledním průchodu dopravníku byla nanosena nanovlákna.

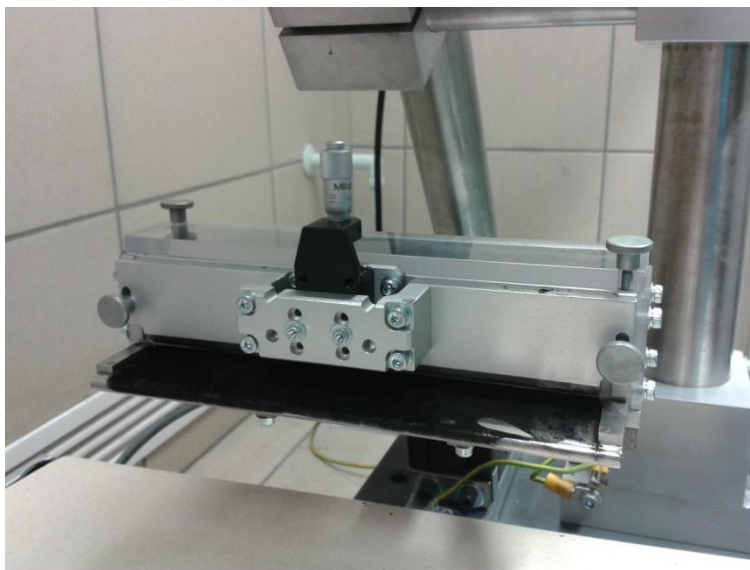
Poslední pátý vzorek byl vyroben obdobně jako vzorek první. Tento vzorek byl vytvořen k porovnání se čtvrtým vzorkem. Prvním průchodem byla spunbond textilie pokryta nanovláknem. U dalších průchodů se vrstva rozmítaného aktivního uhlí střídala s vrstvou nanovláken. Takto byl vyroben devíti vrstvený filtr, který obsahoval 4 vrstvy aktivního uhlí.

Velký rozdíl hmotností u čtvrtého a pátého vzorku (viz tabulka 6) mohl být způsoben neopatrným dynamickým rozmítáním pomocí sonotrody, která nejspíše od foukla značnou část aktivního uhlí z povrchu nanovláken.

Tabulka 6: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – pátá série vzorků

	Amplituda	Celková hmotnost	Hmotnost aktivního uhlí
První vzorek	55%	7,200 g	1,305 g
Druhý vzorek	55%	7,281 g	1,695 g
Třetí (slepý) vzorek	————	5,586 g	————
Čtvrtý vzorek	60%	9,065 g	3,324 g
Pátý vzorek	60%	8,236 g	2,032 g

Po konzultaci s Ing. Chvojkou Ph.D. byla podána žádost firmě Exactec sídlící v Liberci ke zhotovení modifikovaného zásobníku, zobrazeno na obrázku 20, pro zefektivnění dávkování aktivního uhlí. Starý zásobník měl frézované malé díry pro dávkování částic, naproti tomu má nový zásobník volnou celou spodní část a posuvné měřítko pro kontrolu dávkování, podobně jako je u vodních stavidel.



Obrázek 20: Modifikovaná část dávkovacího zařízení

3.4 Laminace vzorků

Laminace probíhala na stroji RPS mini od německé firmy Meyer. Před samotným laminováním musely být nastaveny parametry přístroje. Přítlak byl nastaven na 10N/cm^2 , rychlost otáček pásového dopravníku byla nastavena na 2 km/h a teplota laminace na 140°C .

Po nastavení těchto údajů nastalo čekání, kdy byl přístroj vyhříván na nastavených 140°C . Vzorky byly v tuto chvíli připravovány pro laminaci, kdy se na téměř hotový materiál položil nastříhaný spunbond, totožný s podkladovou textilií používanou při výrobě vzorků. Před vložením prvního vzorku byl mezi pásy laminovacího stroje vložen kus pečicího papíru, který prošel strojem pro zjištění, zda není dopravník moc rychlý. Tento pečicí papír byl poté vždy nasunut na přední část vzorku, který by se jinak nejspíš připekl na pásy dopravníku a točil se přichycený stále dokola. Tímto způsobem byly laminovány všechny vzorky. Teplota laminování se během laminace samovolně snížila na 135°C . Přístroj spojil spodní a vrchní spunbond textilií tím, že se pláště bikomponentních vláken spodní vrstvy roztavily a tlakem byly spojeny s pláští vláken vrchní vrstvy.

Laminací byl získán kompozitní materiál, který byl pevnější a odolnější vůči vnějším vlivům, jenž by jinak zdeformovaly nanovlákná, a docházelo by k degradaci a vysypávání aktivního uhlí.

3.5 Prodyšnost

Prodyšnost vzorků byla měřena na 3 vzorcích použitých z poslední vyráběné série, které jsou více popsány v kapitole 3.3.5. Test probíhal na přístroji znázorněném na obrázku 21. Testovaný filtr o velikosti 10cm^2 byl uchycen do přístroje, kde na něj bylo působeno průtokem vzduchu při konstantním tlakovém spádu $20\text{mm H}_2\text{O}$, což je 196 Pa . Prodyšnost jednotlivých vzorků při průtoku vzduchu je uvedena v tabulce 7, např. $30/180$ = prodyšnost $30\text{ l/dm}^2/\text{min}$ při průtoku vzduchu 180 l/hod .



Obrázek 21: Přístroj na testování prodyšnosti filtrů

Tabulka 7: Prodyšnost vyrobených filtrů (l/dm²/min) při průtoku vzduchu (l/hod)

Vzorky V – 2	Vzorky V – 4	Vzorky V – 5
30 / 180	49,8 / 300	54 / 325
41,4 / 250	106,8 / 640	136,8 / 820
53,4 / 320	133,2 / 800	71,4 / 430
70,2 / 420	124,8 / 750	86,4 / 520
58,2 / 350	120 / 720	108,6 / 650
61,8 / 370	124,8 / 750	128,4 / 770
41,4 / 250	71,4 / 430	183,6 / 1100
41,4 / 250	120 / 720	124,8 / 750
53,4 / 320	71,4 / 430	138,6 / 830
45 / 270	75 / 450	146,4 / 880

Po zprůměrování výsledků bylo zjištěno, že větší prodyšnosti dosahují vzorky s větším počtem vrstev. U prvních dvou vzorků se při výrobě střídala vrstva nanovláken s vrstvou aktivního uhlí, ovšem u třetího vzorku se střídala vrstva aktivního uhlí s dvěma vrstvami nanovláken. První vzorek s pěti vrstvami tedy dosáhl průměrné hodnoty 49,62 l/dm²/min, druhý vzorek s šesti vrstvami měl 99,72 l/dm²/min a poslední vzorek s celkem devíti vrstvami dosahoval průměrné hodnoty 117,9 l/dm²/min.

4 Analýza připravených materiálů

Vyhodnocení vzorků bylo prováděno ve spolupráci s druhým studentem Jirkovcem, který se testováním vzorků zabýval v rámci své bakalářské práce. Všechny informace pro shrnutí vyhodnocení vzorků jsou použity z jeho bakalářské práce, nesoucí název „Charakterizace nanovlákněných elektrostaticky zvlákněných kompozitních materiálů s in-situ integrovanými částicemi“.

4.1 Analýza průměrů vláken

Průměry vláken byly analyzovány z 5000x zvětšených snímků, pořízené na SEM rastrovacím mikroskopu a následně měřeny pomocí počítačového programu NIS – Elements, dříve známý jako Lucia G. Průměry vláken jsou závislé na mnoha faktorech při výrobě [28]. Mezi hlavní příčiny rozdílných průměrů vláken patří teplota a vlhkost prostředí, také vzdálenost nabitých elektrod a dalším faktorem bylo ovlivnění proudem vzduchu pro odvod par a poletujících nanovláken z digestoře.

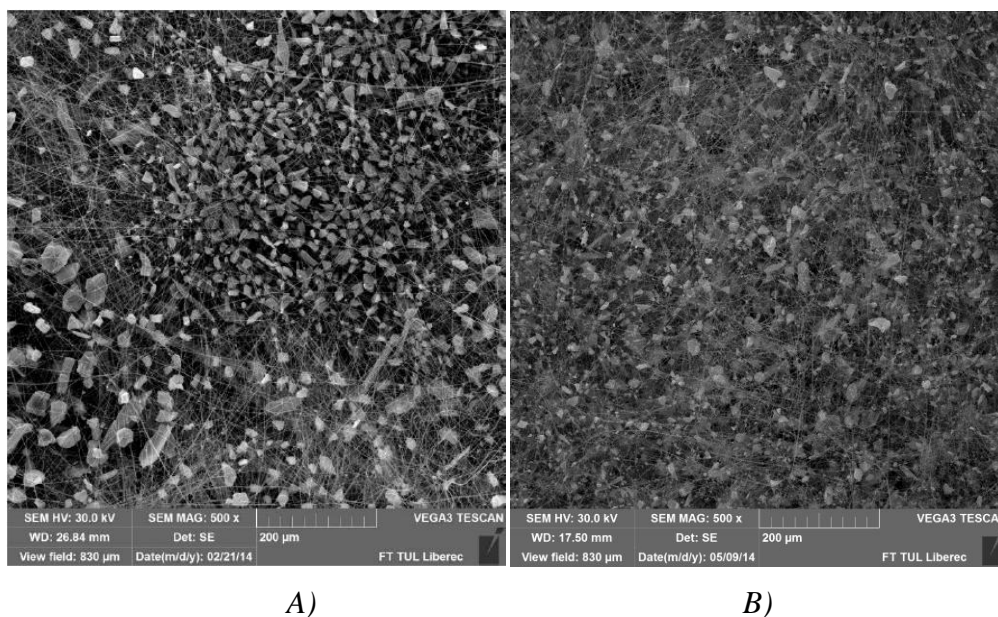
4.2 Analýza homogenity materiálu

Zkoumání rozložení částic aktivního uhlí proběhlo na testovacích vzorcích, velkých přibližně 16mm^2 a z jejich snímků, pořízených na scanning electron microscope (ve zkratce SEM), tedy rastrovacího mikroskopu, tentokrát zvětšených 100x [28].

U prvních vyrobených vzorků bylo předpokládáno, že rozložení aktivního uhlí nebude stejnoměrné jako u následujících vzorků, jejichž vlastnosti se zlepšovaly společně s pokročením technologie. Nedokonalé rozložení částic mohlo být způsobeno: a) přerušovaným dávkováním aktivního uhlí z jeho zásobníku, u kterého docházelo k ucpávání průchodů pro sypání částic, b) uchycováním nanovláken na celé ploše zásobníku aktivního uhlí,

kteřé bránily jeho průchodu (znázorněno na obrázku 19), c) špatným umístěním či manipulováním se sonotrodou.

Při analýze bylo zjištěno, že se aktivní uhlí rozdělovalo podle velikosti či hmotnosti částic a shlukovalo se, znázorněno na obrázku 22 A, což mohlo být způsobeno například vibracemi sonotrody. Ideální rozložení aktivního uhlí je znázorněno na obrázku 22 B, kde jsou částice velikostně rovnoměrně zastoupeny v ploše.



Obrázek 22: Detailní zachycení částic aktivního uhlí. A) Shluk částic B) Ideální promísení částic[28]

4.3 Analýza zaplnění aktivním uhlím

Postup měření zaplnění byl popsán v bakalářské práci výše zmíněného Jirkovce, kde lze také nalézt podrobnější analýzu každého vzorku.

Měření zaplnění bylo prováděno pouze v ploše vrstvy a ne v celém objemu materiálu, což může být zkreslující. Nízké hodnoty zaplnění v ploše, uvedené v tabulce 8, proto nemusejí odpovídat malému zaplnění v celém materiálu. Pro přesné hodnoty by tedy bylo nutné provést test zaplnění v celém objemu vzorku [28].

Tabulka 8: Zaplnění aktivního uhlí v ploše materiálu [28]

Vzorek	Místo nejvíce do kraje	Místo mezi krajem a středem	Místo ve středu vzorku
Vzorky I – 1	26% ± 7%	27% ± 2%	23% ± 9%
Vzorky I – 2	22% ± 2%	17% ± 5%	15% ± 6%
Vzorky I – 3	24% ± 2%	23% ± 3%	22% ± 1%
Vzorky I – 4	12% ± 3%	15% ± 6%	25% ± 3%
Vzorky II – 2	22% ± 2%	23% ± 3%	18% ± 3%
Vzorky II – 3	15% ± 1%	29% ± 3%	22% ± 2%
Vzorky III – zkušební	16% ± 3%	17% ± 2%	14% ± 3%
Vzorky III – 1	15% ± 1%	17% ± 2%	14% ± 4%
Vzorky III – 2	18% ± 2%	17% ± 2%	10% ± 3%

4.4 Analýza úbytku hmotnosti aktivního uhlí

Analýza úbytku hmotnosti byla prováděna na testovacím filtračním zařízení spalinových filtrů, které se nachází v laboratorní místnosti budovy CXI, spadající pod Technickou univerzitu v Liberci [28].

Pro testy byly použity laminované vzorky, podrobněji popsány v kapitole 3.4, které byly v podobě kruhu o průměru 15 - ti centimetrů váženy a následně upevněny do zařízení. V přístroji byl vzorek podroben proudu vzduchu, který působil na celý materiál a vyfoukával částice aktivního uhlí. Po uplynutí 30 – ti minut byl vzorek vyjmut, zvážen a následně byl vypočítán procentuální úbytek hmotnosti aktivního uhlí. V tabulce 9 je vyjádřen úbytek hmotnosti aktivního uhlí testovaných vzorků [28].

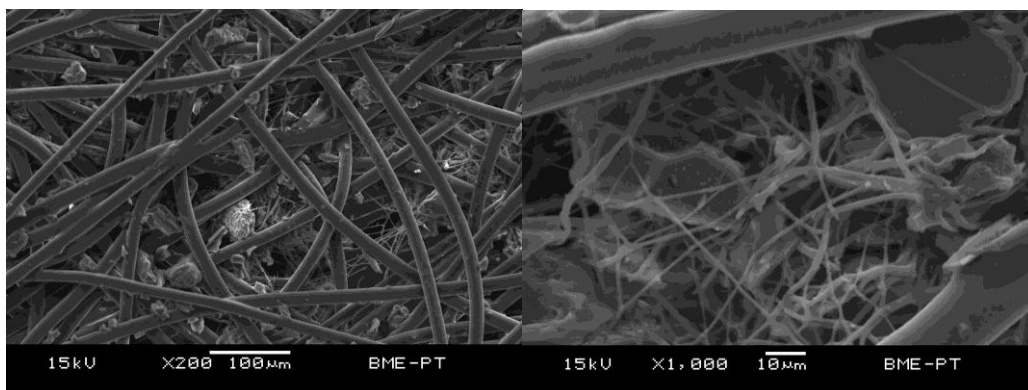
Tabulka 9: Úbytek hmotnosti aktivního uhlí [28]

Vzorek	Hmotnost před testem	Hmotnost po testu	Procentuální vyjádření
Vzorky I – 1	0,8302 g	0,8049 g	3,047%
Vzorky I – 2	0,8146 g	0,8063 g	1,02%
Vzorky I – 3	0,7952 g	0,7798 g	1,94%
Vzorky I – 4	0,8346 g	0,8230 g	1,39%
Vzorky II – 2	0,8108 g	0,7997 g	1,37%
Vzorky II – 3	0,7793 g	0,7568 g	2,89%
Vzorky III – zkušební	0,7767 g	0,7537 g	2,96%
Vzorky III – 1	0,8450 g	0,8357 g	1,1%
Vzorky III – 2	0,8077 g	0,7952 g	1,55%

4.5 Porovnání rozdílných materiálů

K vizuálnímu porovnání byly použity tři vzorky, které byly analyzovány ze snímků pořízených na SEM mikroskopu docentkou Košťákovou. Prvním analyzovaným materiálem byla kompozitní vrstva z kapitoly 3.3.4. Druhým zkoumaným vzorkem byl vyrobený materiál pocházející ze série zhotovených vzorků, jejichž výroba je podrobněji popsána v kapitole 3.3.5. Posledním materiálem byla vojenská bunda používaná AČR, tedy Armádou České republiky.

Prvním zkoumaným vzorkem (viz obrázek 23) byl laminovaný vzorek vyrobený z polymeru PVB, z kterého byla vyrobena většina nanovlákných vrstev. Vzorek byl vyráběn amplitudou naprášení aktivního uhlí 35%. Prvním průchodem byla nanosena nanovlákna na podkladový materiál, poté procházel pěti cykly naprášení aktivního uhlí s následným nanosením nanovláken, a v posledních dvou cyklech otočení byly nanášena nanovlákna.

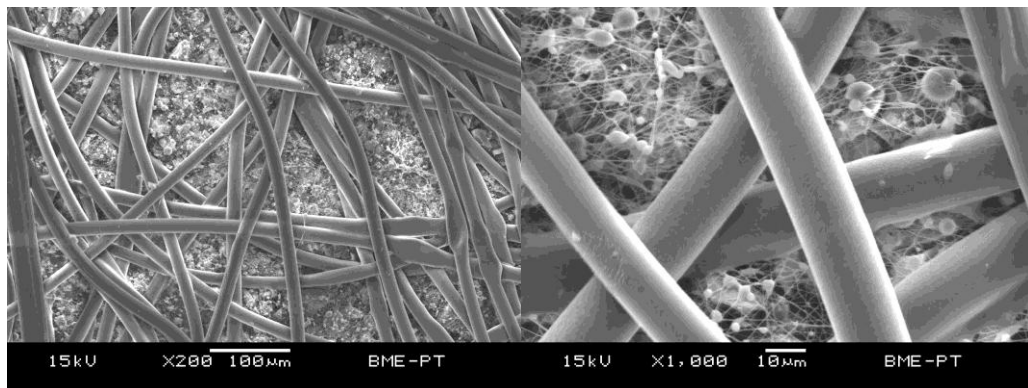


Obrázek 23: Detailní snímek vzorku z PVB polymeru po laminaci

Důkladnější analýzou bylo zjištěno viditelné poškození nanovláken, která byla již v průběhu výroby nesprávně zvláknována. Po laminaci došlo k jejich potrhání a nanovláknenná vrstva nezůstala celistvá. I větší částice aktivního uhlí ulpěly mezi vlákny spunbondu. Aktivní uhlí bylo viditelné i na povrchu podkladové textilie, což ale mohlo být způsobeno i neopatrnou manipulací se vzorkem u naprašovacího přístroje.

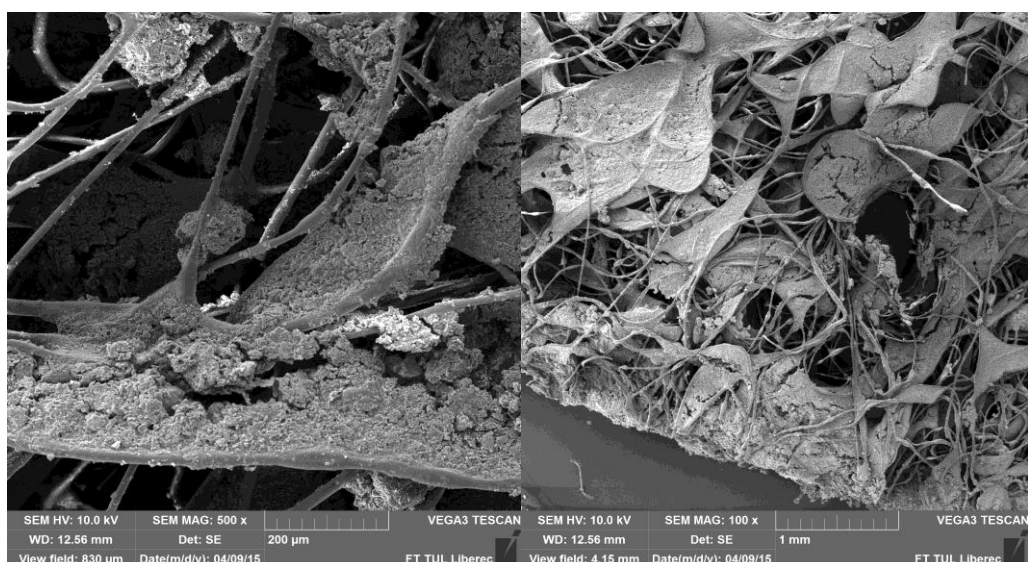
Druhým materiálem pro analýzu byl také laminovaný vzorek, tentokrát vyroben z PVDF polymeru (viz obrázek 24), který byl použit pouze u poslední série vyráběných kompozitních vrstev. Vzorek byl vyroben celkem ze sedmi vrstev při amplitudě dávkování sypání aktivního uhlí 55%. Podkladový materiál byl nejprve pokryt nanovláknem, poté prošel jedním cyklem nanosení aktivního uhlí, s následným dvojitým pokrytím elektricky zvlákněného polymeru. Tímto způsobem byly vyrobeny celkem tři vrstvy s částicemi aktivního uhlí.

Analýzou nebylo zjištěno jakékoliv poškození nanovláken s inkorporovaným aktivním uhlím. Vrstva byla velmi dobře viditelná mezi póry spunbondu. Větším přiblížením byly zjištěny defekty nanovláken, jejich funkčnost však nebyla snížena a aktivní uhlí držela dobře.



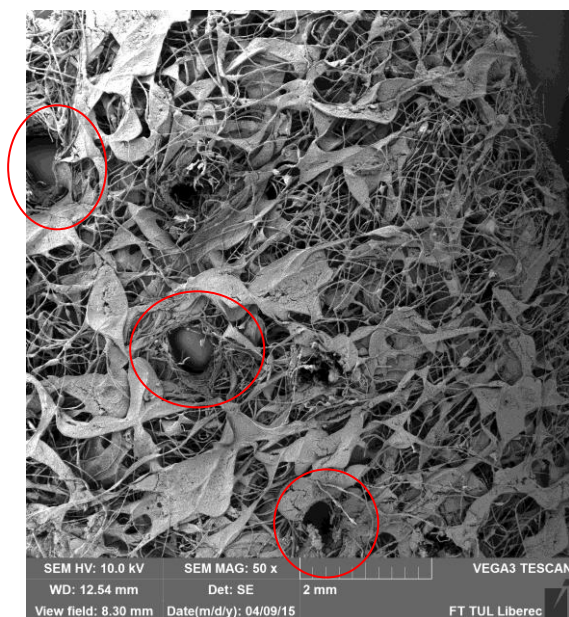
Obrázek 24: Detailní snímek vzorku z polymeru PVDF po laminaci

Posledním vzorkem byla již zmíněná vojenská funkční bunda, vyrobená ze tří vrstev, kde spodní vrstvou byla podšívkovina, vrchní vrstva tvořena z bavlny s vodoodpudivou ochranou, a mezi nimi byla podle odhadů silná vrstva netkané textilie s inkorporovaným aktivním uhlím a pojivem, což je znázorněno na obrázku 25.



Obrázek 25: netkaná textilie s inkorporovaným aktivním uhlím a pojivem

Na první pohled bylo zřejmé, že použité pojivo zachycuje aktivní uhlí k zabránění jeho sesypání. Pojivo ovšem zaslepuje póry netkané textilie a velmi tak snižuje prodyšnost materiálu. Na obrázku 26 byly zpozorovány díry po průniku jehel, které měli nejspíš zlepšit prodyšnost materiálu. Ochranný oděv je i tak málo prodyšný a svou konstrukcí poměrně těžký.



Obrázek 26: Průniky jehel pro prodyšnost materiálu

Diskuze

Vzorky byly vyráběny v pěti sériích, kdy byl ve čtyřech sériích používán polymer PVB a v poslední sérii polymer PVDF. S první výrobou vzorků bylo zjištěno pouze nesprávné dávkování aktivního uhlí, které bylo s pozdějším zjištěním spojeno s nesprávným zatížením či vyvážením přístroje, neboť přtlakem na přístroj se aktivní uhlí dávalo lépe. Při druhé sérii vzorků byla sonotroda s dávkovačem aktivního uhlí pootočena o cca. 30°, během výroby bylo manipulováno s přístrojem pro zkvalitnění rozložení aktivního uhlí. U třetí výroby filtrů byl modifikován dopravník a odinstalována sonotroda z držáku, na aktivní uhlí bylo působeno její proměnlivou polohou, kdy bylo dosaženo rovnoměrnějšího rozložení aktivního uhlí. Čtvrtá série výroby měla vyzdvihnout lepší či horší postup výroby, kdy se ovšem polymer zvlákňoval v provazcích a vzorky tím byly deformovány. Během poslední výroby bylo zjištěno, že se vzorky mnohem lépe vyrábějí z PVDF polymeru, který se účinněji zvlákňoval. Viditelným usazováním poletujících vláken bylo zjištěno zanášení cest pro dávkování aktivního uhlí, které byly čištěny a dávkování tak bylo efektivnější.

Tímto bylo dosaženo kompozitního materiálu, který byl finální úpravou laminací poničen. K deformacím nanovláken došlo pouze u některých vzorků, což zapříčinilo sesypání aktivního uhlí a snížení funkčnosti filtru, a proto by bylo doporučeno pojení ultrazvukem, jež by bylo schopné svařovat jen okraje materiálu a nedeformovalo by nanovlákná.

Nakonec byly porovnávány vzorky z netkaného materiálu používané v oděvech Armádou České republiky s vyrobenými vzorky z nanovláken. Podle snímků z mikroskopu je vidět, že je netkaný materiál vyplněn aktivním uhlím. Problém nastává u prodyšnosti materiálu, která je nízká. Podrobnějším zkoumáním byly viditelné průchody v netkané textilií, nejspíše z vpichovací technologie, která měla prodyšnost pravděpodobně zvýšit. Aktivní uhlí se zdá být nedostatečně zabezpečeno proti sypaní, ačkoliv je pojené lepidlem či polyuretanem, popsáno v kapitole 1. Naopak analýza vyráběných filtrů z nanovláken s aktivním uhlím vykazovala dobré hodnoty při testech úbytku

hmotnosti v zařízení pro měření účinnosti spalínových filtrů a dobré hodnoty byly naměřeny i při testu prodyšnosti. Ještě lepšího dávkování aktivního uhlí a jeho rozložení po ploše textilie by mohlo být dosaženo pomocí nového dávkovacího zařízení a zásobníku.

Závěr

V teoretické části byly popsány technologie a materiály, které byly použity pro výrobu filtrů. Důraz je kladen především na aktivní uhlí, které bylo použito pro svou schopnost odstranit nebo absorbovat škodlivé látky z vody, vzduchu i plynů na svém velkém měrném povrchu.

Praktická část se zabývala výrobou filtrů pro vylepšení funkční vrstvy s aktivním uhlím v ochranných oděvech proti bojovým chemickým látkám, které je aktivní uhlí schopné přeměnit na látky bezpečné. Výrobou filtrů byl dosažen pokrok nejen v technologii výroby vylepšením dopravníku, kontinuálním dávkování aktivního uhlí a změnou polohy sonotrody ale také v kvalitě vyrobených vzorků, a to hlavně rovnoměrnějším rozložení aktivního uhlí v ploše materiálu a uložení jeho částic v nanovlákních. Právě upevněním částic aktivního uhlí mezi nanovlákná došlo k zamezení jejich sesypávání. Nakonec i laminace mezi spunbond textile pomohla zamezit propadávání aktivního uhlí a vytvořila kompozitní materiál, který je lehký a odolný proti mechanickému namáhání.

Analýza snímků z elektronového mikroskopu potvrdila zvýšení stejnoměrnosti rozložení aktivního uhlí. Dobré výsledky byly i z testovacího přístroje na spalínové filtry, které také potvrdily správnou funkčnost filtrů i při úbytku hmotnosti aktivního uhlí do tří procent. Vyhodnocením zaplnění bylo zjištěno nesprávné zaplnění vrchní vrstvy aktivním uhlím, které bylo testováno pouze v ploše a pro správnost výsledku by bylo nutné provést test v celém objemu filtru.

Seznam použité literatury:

- [1] REUNGOAT, J., M. MACOVA, B. I. ESCHER, S. CARSWELL, J. F. MUELLER a J. KELLER. *Removal of micropollutants and reduction of biological activity in a full scale reclamation plant using ozonation and activated carbon filtration. Water Research.* 2010, vol. 44, issue 2, s. 265-318. DOI: 10.1002/9783527639441.ch9.
- [2] D. GIGLIA, Robert a Edward EDWARD A. BATTISTELLI. Non-woven activated carbon fabric [patent]. Spojené státy americké. US4565727 A. Uděleno 21. leden 1986. Zapsáno 23. duben 1985.
- [3] GOPALAKRISHNAN, D., N. NITHIYAKUMAR a Arpita NAYAK. Development of chemical protective clothing. Dostupné z: <http://www.fibre2fashion.com/industry-article/1/85/development-of-chemical-protective-clothing1.asp>
- [4] YANG, Ralph T. *Adsorbents: fundamentals and applications.* Hoboken,: John Wiley, 2003, xii, 410 s. ISBN 04-712-9741-0
- [5] MARSH, Harry a F RODRÍGUEZ-REINOSO. *Activated carbon: fundamentals and applications.* 1st ed. Boston: Elsevier, 2006, xvii, 536 p. ISBN 00-804-4463-6.
- [6] Člověk a pitná voda. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://nadrevo.blogspot.cz/2010/02/clovek-pitna-voda.html>
- [7] HAYASHI, Jun'ichi, Atsuo KAZEHAHA, Katsuhiko MUROYAMA a A. Paul WATKINSON. *Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation.* ISBN 10.1016/s0008-6223(00)00027-0.
- [8] WILLIAMS, P a A REED. *Development of activated carbon pore structure via physical and chemical activation of biomass fibre waste: fundamentals and applications.* 1st ed. Boston: Elsevier, 2006, xvii, 536 p. ISBN 10.1016/j.biombioe.2005.11.006.
- [9] MARSH, Harry. *Activated carbon compendium: a collection of papers from the journal Carbon 1996-2000.* 1st ed. New York: Elsevier, 2001, xxi, 297 p. ISBN 00-804-4030-4.
- [10] Aktivní uhlí. *ERSPOL, s.r.o.* [online]. [cit. 2015-05-01]. Dostupné z: http://www.erspol.cz/index.php?site=aktivni_uhli

- [11] Semipermeabilní membrána. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Polopropustn%C3%A1_membr%C3%A1na
- [12] Zdravotnická škola: Laboratorní technika. *Vyšší odborná škola zdravotnická a Střední zdravotnická škola Hradec Králové* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://lat.zshk.cz/vyuka/filtrace.aspx>
- [13] Košťáková E. Textilní nanovlákná (přednáška) Liberec: TUL, 2014
- [14] LI, D., Y. XIA. Electrospinning of nanofibers reinventing the wheel. *Advanced Materials*. 2004, vol. 16, issue 14.
- [15] Nanospider. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Nanospider>
- [16] PAVLÍK, Tomáš. Fundamentální akciová analýza (Pegas Nonwovens). [online]. [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: <http://www.pegas.cz/technologie-spunbond>
- [17] Swicofil. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.swicofil.com/nonwovenpafiber.html>
- [18] ATUL DAHIYA, Atul, M. G. KAMATH a Raghavendra R. HEGDE NONWOVENS SCIENCE AND TECHNOLOGY II: Bicomponents fiber [online]. [cit. 2015-01-04]. Dostupné z: <http://www.engr.utk.edu/mse/Textiles/Bicomponent%20fibers.htm>
- [19] ATUL DAHIYA, Atul, M. G. KAMATH a Raghavendra R. HEGDE. NONWOVENS SCIENCE AND TECHNOLOGY II: Spunbond technology. [online]. 2004 [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.engr.utk.edu/mse/pages/Textiles/Spunbond%20Technology.htm>
- [20] Desikant. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Desikant>
- [21] Ultrazvuk. *Techmania: Edutorium* [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: http://techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=416b757374696b61h&key=985
- [22] Chvojka J.: Přednáška 3 [Termické a chemické technologie výroby NT - přednášky] Liberec. TUL, 2013

- [23] Novák O.: Význam a hlavní typy úprav technických textilií [Technické textilie - přednášky] Liberec. TUL, 2012
- [24] Adfors Saint-Gobain. [online]. [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://www.sg-adfors.com/cz/Technologie/Textilie/Laminace>
- [25] KRATOCHVÍL, Bohumil, Václav ŠVORČÍK a Dalibor VOJTĚCH. *Úvod do studia materiálů*. Vyd. 1. Praha: VŠCHT, 2005, 190 s. ISBN 80-708-0568-4.
- [26] Polyvinyl Butyral. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2015-04-29]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Desikant>
- [27] POKORNÝ, P., LUKÁŠ, D., MIKEŠ, P., VYSLOUŽILOVÁ, L., CHVOJKA, J., *Způsob vytváření funkční nanovlákněné vrstvy a zařízení k provádění způsobu* [patent]. CZ 302901 B6.
- [28] JIRKOVEC, Radek. *Charaterizace nanovlákněných elektrostaticky zvlákněných kompozitních materiálů s in-situ integrovanými částicemi*. Technická univerzita v Liberci, 2014. Bakalářská práce. Technická univerzita. Vedoucí práce Ing. Eva Košťáková, Ph.D.

Seznam obrázků:

Obrázek 1: Suroviny pro výrobu aktivního uhlí [6]	15
Obrázek 2: Polopropustná membrána (žlutě). Převzato z [11].....	17
Obrázek 3: Zvlákňování polymeru. Převzato z [13].....	19
Obrázek 4 : Zvlákňování pomocí válečku. Převzato z [13]	20
Obrázek 5: Bikomponentní vlákna jádro/plášť [17]	21
Obrázek 6: Různé typy silikagelu [10]	23
Obrázek 7: Zdroj ultrazvuku.....	24
Obrázek 8: Sonotroda pro rozptýlení aktivního uhlí	25
Obrázek 9 : Synergický jev [25]	26
Obrázek 10: Strukturní vzorec PVB [26]	27
Obrázek 11: Rozpuštěný kopolymer PVDF v DMA.....	29
Obrázek 12: Laboratorní přístroj pro výrobu nanovláknenných filtrů. Přístroj se skládá z: 1) Dávkovací silo aktivního uhlí 2) Sonotroda 3) Dopravník s vyráběným filtrem 4) Strunný váleček ve vaničce s polymerem 5) Vibrační zařízení (dávkování aktivního uhlí).....	30
Obrázek 13: Nerovnoměrné dávkování aktivního uhlí.....	33
Obrázek 14: Natočené dávkovací zařízení se sonotrodou	34
Obrázek 15: Válečky dopravníku. 1) Poháněný váleček 2) Nepoháněný váleček	35
Obrázek 16: Modifikovaný dopravník	35
Obrázek 17: Špatně skládaný pás dopravníku	36
Obrázek 18: Schematické znázornění vrstev	41
Obrázek 19: Zachycující se nanovláknna	41
Obrázek 20: Modifikovaná část dávkovacího zařízení.....	43
Obrázek 21: Přístroj na testování prodyšnosti filtrů	44
Obrázek 22: Detailní zachycení částic aktivního uhlí. A) Shluk částic B) Ideální promísení částic [28]	47
Obrázek 23: Detailní snímek vzorku z polymeru PVB po laminaci	50
Obrázek 24: Detailní snímek vzorku z polymeru PVDF po laminaci.....	51
Obrázek 25: netkaná textilie s inkorporovaným aktivním uhlím a pojivem	51
Obrázek 26: Průniky jehel pro prodyšnost materiálu	52

Seznam tabulek:

Tabulka 1: Objem pórů pro různé suroviny [4]	14
Tabulka 2: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí - první série výroby	33
Tabulka 3: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí - druhá série výroby.....	35
Tabulka 4: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – třetí série výroby.....	38
Tabulka 5: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – čtvrtá série výroby	39
Tabulka 6: Hmotnosti vzorků a aktivního uhlí – pátá série vzorků.....	42
Tabulka 7: Prodyšnost vyrobených filtrů ($\text{l/dm}^2/\text{min}$) při průtoku vzduchu (l/hod)	45
Tabulka 8: Zaplnění aktivního uhlí v ploše materiálu [28]	48
Tabulka 9: Úbytek hmotnosti aktivního uhlí [28]	49

Seznam zkratek:

nm – nanometr

μm – mikrometr

mm – milimetr

cm – centimetr

m – metr

km – kilometr

g – gram

h – hodina

sec - sekunda

g – gram

mol – značka látkového množství

°C – stupně celsia

N - newton

kHz – kilohertz

Hz – hertz

PVB – polyvinyl butyral

PVDF – polyvinyliden fluorid

DMA – dimethylacetamid

SEM – elektronový mikroskop

hm% – hmotnostní procenta

t – čas

s – dráha

v - rychlost

Pa – pascal

H₂O – voda